

文章编号:0253-9950(2010)01-0046-06

水合二氧化锰(HMD)和水合五氧化二锑(HAP) 用于 HNO₃ 溶液中 Sr、Cs、Zr、Ru、Se、Ce 和 Sm 的去除研究

邓启民,李茂良,程作用

中国核动力研究设计院 云克药业,四川 成都 610041

摘要:研究了水合二氧化锰(HMD)和水合五氧化二锑(HAP)对铀的吸附性能,以及在 HNO₃ 溶液中对 Sr、Cs、Zr、Ru、Se、Ce 和 Sm 的吸附性能。HMD 和 HAP 在硝酸铀酰溶液中不吸附铀。HMD 在 0.2 mol/L HNO₃ 溶液中对 Zr、Ru 和 Se 的吸附性能较好,HAP 在 0.2 mol/L HNO₃ 溶液中对 Sr、Cs、Ce 和 Sm 的吸附性能较好。含有 Sr、Sm、Ru、Ce、Zr 和 Se 混合元素的 0.2 mol/L HNO₃ 依次通过 HMD 和 HAP 柱吸附后,元素基本被全部吸附。研究结果表明,HMD 和 HAP 可以用于 HNO₃ 溶液中 Sr、Sm、Ru、Ce、Zr、Cs 和 Se 等医用同位素生产堆燃料溶液中主要裂变产物元素的去除。

关键词:水合二氧化锰;水合五氧化二锑;硝酸铀酰;医用同位素生产堆;裂变元素

中图分类号:TL922 **文献标志码:**A

Removal of Sr, Cs, Zr, Ru, Se, Ce and Sm From HNO₃ Solution With Hydrated Manganese Dioxide and Hydrated Antimony Pentoxide

DENG Qi-min, LI Mao-liang, CHENG Zuo-yong

Nuclear Power Institute of China, YUNKE Pharmacy, Chengdu 610041, China

Abstract: The adsorption behavior of U, Sr, Cs, Zr, Ru, Se, Ce and Sm on hydrated manganese dioxide (HMD) and hydrated antimony pentoxide (HAP) was studied. HMD and HAP have no adsorbability for uranium. Zr, Ru and Se are strongly adsorbed by HMD, while Ce, Sr, Sm and Ce are strongly adsorbed by HAP. Sr, Zr, Ru, Se, Ce and Sm in nitric acid solution can quantitatively be absorbed on the exchangers, by passing the solution successively through a HMD column and a HAP column. The results show that HMD and HAP can be used for the removal of fission products such as Sr, Cs, Zr, Ru, Se, Ce and Sm in the fuel solution from medical isotope production reactor(MIPR).

Key words: hydrated manganese dioxide; hydrated antimony pentoxide; UO₂(NO₃)₂ solution; medical isotope production reactor; fission products

收稿日期:2008-09-19;修订日期:2009-03-10

基金项目:中国核动力研究设计院“医用同位素技术研发项目”

作者简介:邓启民(1979—),男,江西遂川人,博士,副研究员,核技术应用专业

医用同位素生产堆(MIPR)是以硝酸铀酰溶液($c(\text{HNO}_3) = 0.1 \sim 0.3 \text{ mol/L}$, $\rho(\text{U}) = 50 \text{ g/L}$)为燃料的均匀性水溶液反应堆,主要用于生产⁹⁹Mo、¹³¹I 和⁸⁹Sr,反应堆每运行 24~48 h 后停堆进行医用同位素的提取,反应堆的燃料溶液循环使用^[1]。MIPR 长期运行后,裂变产物积累较多,运行 1 a 后燃料溶液中主要裂变产物量达到 40 g 以上,运行 2 a 后燃料溶液中主要裂变产物量达到 68 g 以上。其中有中子毒物,如 Sm、Eu、Gd 等;长寿命放射性核素有¹³⁷Cs 和⁹⁰Sr 等;中长寿命放射性核素有⁸⁹Sr、⁹⁵Zr、¹⁰⁶Ru、¹⁴⁰Ba、¹⁴¹Ce、¹⁴⁴Ce、¹⁵⁶Eu 等。这些累积裂变产物的存在增加了燃料溶液的放射性剂量,并降低了反应堆堆芯的有效增值系数(K_{eff}),因此应定期净化燃料溶液,除去多余的裂变产物^[2]。

常规的乏燃料后处理工艺主要采用 Purex 流程,利用 TBP 等萃取剂萃取 U 和 Pu 以达到分离裂变产物的目的^[3]。但由于 MIPR 燃料溶液未经长期冷却衰变、放射性强、辐射防护难以解决,同时辐射水平太高会引起溶剂辐射分解,造成萃取设备堵塞,使萃取过程难以正常进行,因此难以使用 Purex 流程进行燃料溶液的纯化,需要寻找其它的工艺。

由于无机离子交换剂具有耐辐射、对离子选择性强等优点^[4],从上世纪 50 年代起,用无机离子交换剂从放射性废液中分离⁹⁰Sr、¹³⁷Cs 和其它阳离子的研究很多,在这些研究中使用比较多的是水合五氧化二锑(HAP)^[5-11]和水合二氧化锰(HMD)^[12-15]等水合氧化物,以及磷酸锆(ZrP)等杂多酸盐无机交换剂^[16-18]。美国汉福特工厂也采

用铝硅酸盐交换剂分离放射性废液中的锕系元素、碱金属和碱土金属^[19]。如果无机离子交换剂能够作为 MIPR 燃料溶液纯化用的材料,燃料溶液纯化时只需要将热室中的医用同位素提取柱替换成燃料溶液净化柱,在 MIPR 堆停后,让燃料溶液通过净化柱吸附而达到燃料溶液纯化的目的。由于 MIPR 的特殊性,燃料溶液纯化用的交换剂必须不吸附铀而吸附大多数裂变产物、性能稳定、不能将其它杂质引入到燃料溶液。根据交换剂的性质以及 MIPR 的特点,选取 HMD、HAP 和 ZrP 作为本研究用的交换剂。

本工作拟研究 HMD、HAP 和 ZrP 对铀的吸附性能,以及 HMD 和 HAP 对 MIPR 燃料溶液中主要的中长寿命裂变产物(Sr、Zr、Ru、Ce、Se、Cs)和主要中子毒物核素(Sm)的吸附性能,通过研究选取 MIPR 燃料溶液纯化用的交换剂和纯化工艺。

1 实验方法

1.1 实验仪器与试剂

IRRS-H2-DVO 电感耦合等离子体(ICP),美国热电公司;DIONEX-300 型离子色谱,美国戴安公司;KS-130 振荡器,德国 IKA 公司;自制玻璃色谱层析柱($\phi 8 \text{ mm}$)。

硝酸铀酰溶液由天然铀配制,溶液中各元素的浓度为 MIPR 以 200 kW 运行 1 a 后的生成量,实验中所使用元素的化合物形式列于表 1。180~380 μm HMD、HAP 和 ZrP 交换剂,采用文献^[12, 18, 20]方法合成;实验试剂均为分析纯;实验用水为去离子水。

表 1 模拟 MIPR 燃料溶液中裂变元素浓度

Table 1 Concentrations of elements in simulated fuel solution of MIPR

元素 (Elements)	$\rho/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	化合物 (Compounds)	元素 (Elements)	$\rho/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	化合物 (Compounds)
Cs	60	CsNO ₃	Sm	8	Sm(NO ₃) ₃
Sr	20	Sr(NO ₃) ₂	Ce	50	Ce(NO ₃) ₃
Zr	70	Zr(NO ₃) ₄	Se	30	Se
Ru	30	RuCl ₃			

1.2 交换剂对铀的吸附性能研究

1 g HMD、HAP 和 ZrP 交换剂分别装填在 $\phi 8 \text{ mm}$ 玻璃色谱柱中(高径比约为 2.5 : 1),依次

加入 20 mL 去离子水和 20 mL 0.2 mol/L HNO₃ 溶液清洗。然后分别加入 50 mL 不同铀浓度的 UO₂(NO₃)₂ 溶液(U 质量浓度分别为 20 mg/L,

1 g/L 和 50 g/L, $c(\text{HNO}_3) = 0.2 \text{ mol/L}$) 进入色谱柱吸附, 最后加入 40 mL 0.2 mol/L HNO_3 溶液淋洗, 测定吸附流出液和淋洗流出液中铀的浓度, 计算铀的损失率。

1.3 HMD 和 HAP 在不同浓度 HNO_3 溶液中对元素的静态吸附研究

0.5 g HMD 交换剂加入到 25 mL 含有不同元素和不同浓度的 HNO_3 溶液中, 溶液在振荡器上振荡 24 h 后测定溶液中各元素的浓度, 由公式 (1) 计算不同浓度 HNO_3 溶液中元素在 HMD 和 HAP 上的静态分配系数。

$$K_d = \frac{(\rho_0 - \rho)/m}{\rho/V} \quad (1)$$

式中, K_d , 静态分配系数, mL/g; ρ 为溶液中元素质量浓度, mg/L; V 为溶液体积, mL; ρ_0 为震荡前溶液中元素质量浓度, mg/L; m 为交换剂质量, g。

1.4 HMD 和 HAP 在 HNO_3 溶液中对元素的动态吸附研究

1 g HMD 和 1 g HAP 交换剂分别装填入 $\phi 8 \text{ mm}$ 玻璃色谱柱, 交换剂预处理后分别加入含有不同元素的 HNO_3 溶液吸附 ($c(\text{HNO}_3) = 0.2 \text{ mol/L}$), 测定吸附流出液中元素的浓度。

1.5 交换剂联合使用对 HNO_3 溶液中混合裂变元素的纯化研究

1 g HMD 和 1 mL HAP 交换剂分别装填在 $\phi 8 \text{ mm}$ 玻璃色谱柱, 交换剂预处理后, 含有混合裂变元素的 HNO_3 溶液依次通过 HMD 和 HAP 吸附, 测定吸附流出液中元素的浓度, 研究交换剂联合使用后的纯化效果。

2 结果与讨论

2.1 交换剂对铀的吸附性能

表 2 为 50 mL 不同浓度 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 溶液经过 HMD、HAP 和 ZrP 吸附后铀的损失率。50 mL $\rho(\text{U}) = 50 \text{ g/L}$ 的 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 溶液通过 HAP 和 HMD 吸附后, 铀的损失率分别为 4.60% 和 2.74%; 而 50 mL $\rho(\text{U}) = 20 \text{ mg/L}$ 的 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 溶液通过 HAP 和 HMD 吸附后, 铀的损失率分别为 1.91% 和 0.279%。低浓度和高浓度铀溶液通过 HAP 和 HMD 吸附后, U 的损失很小, 说明交换剂不吸附 U 或者是对 U 的吸附容量很小, 因此 HMD 和 HAP 可以用于硝酸铀酰溶液中裂变元素的去除研究。但是不同浓度 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 溶液通过 ZrP 吸附后, 溶液中的 U

全部被 ZrP 吸附, 说明 ZrP 对 U 的吸附容量较大, 因此 ZrP 不能用于硝酸铀酰溶液中裂变元素的去除。

表 2 HMD、HAP 和 ZrP 吸附不同质量浓度的 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 溶液后 U 的损失率

Table 2 Loss percentage of U on HMD, HAP and ZrP

交换剂 (Exchangers)	U 损失率 (Loss percentage of U) / %		
	$\rho(\text{U}) = 50 \text{ g/L}$	$\rho(\text{U}) = 1 \text{ g/L}$	$\rho(\text{U}) = 20 \text{ mg/L}$
HMD	2.74	0.527	0.279
HAP	4.60	1.35	1.91
ZrP	100	100	100

2.2 HMD 和 HAP 在 HNO_3 溶液中对裂变元素的静态分配系数

表 3 和表 4 分别为 HMD 和 HAP 在不同浓度 HNO_3 溶液中对 7 种裂变元素的静态分配系数。表 3 的数据表明, HNO_3 溶液中 Sr、Sm、Ce 和 Cs 在 HMD 上的分配系数小, HMD 对其吸附性能差; 低酸度 HNO_3 溶液中 Ru 和 Zr 的分配系数大 ($> 10^3$), HMD 在低酸度溶液中对这两种元素的吸附性能好; Se 的静态分配系数在低酸度和高酸度 HNO_3 溶液中都比较大, 因此 HMD 对 Se 吸附性能很好。表 4 的数据表明, 低酸度溶液中, Sr、Sm、Ce 和 Cs 在 HAP 上的静态分配系数较大, HAP 对其吸附性能较好; 含 Zr 的溶液中有大量沉淀, Zr 在低酸度下分配系数较高是由于其生成沉淀造成; 而 Ru 和 Se 在 HAP 上的分配系数小, HAP 对其吸附较差。MIPR 燃料溶液的酸度为 0.1~0.3 mol/L, 而在此酸度范围内 HMD 对 Ru、Zr 和 Se 的吸附较好, HAP 对 Sr、Cs、Sm 和 Ce 的吸附较好, 这两种交换剂对主要的 7 种裂变元素的吸附能力为互补关系。

2.3 交换剂在 HNO_3 溶液中对元素的动态吸附研究结果

图 1 为 HMD 在 0.2 mol/L HNO_3 溶液中分别对 Se、Zr 和 Ru 裂变元素的穿透曲线, HMD 对 Se 和 Zr 的吸附容量分别为 5.76 mg/g 和 6.28 mg/g; Ru 的吸附流出液虽然在前 50 mL 中 Ru 的质量浓度达到 1.114 mg/L, 但是吸附液达到 250 mL 时吸附流出液中 Ru 的质量浓度仍为 1.356 mg/L, HMD 吸附 250 mL 含 Ru 溶液中对 Ru 的吸附率达到 95.8%, 因此, HMD 对 Ru 也有比较大的吸附容量; 而 HMD 对 Sr、Cs、Ce 和

表 3 HMD 在不同浓度 HNO₃ 中对元素的静态分配系数

Table 3 Partition coefficient of different elements on HMD in different concentration of nitric acid solutions

c(HNO ₃)/ (mol · L ⁻¹)	元素静态分配系数(Partition coefficient of different elements)/(mL · g ⁻¹)						
	Sr	Zr	Ru	Sm	Ce	Se	Cs
0.05	0.05	>8.20×10 ⁴ *	1.25×10 ⁴	21.0	19.6	1.62×10 ⁴	24.3
0.2	1.26	>8.20×10 ⁴ *	2.83×10 ³	2.42	37.6	1.06×10 ⁴	17.2
1.0	1.09	5.24×10 ³	7.79×10 ²	4.03	52.7	1.06×10 ⁴	13.3
3.0	2.06	6.05×10 ²	1.94×10 ²	4.70	34.9	1.07×10 ⁴	8.71
6.0	2.23	70.5	1.32×10 ²	5.89	32.0	1.47×10 ⁴	6.71

注(Note): * 表示溶液中元素浓度低于检测限,该静态分配系数值为检测限浓度计算值;表 4 同(* indicated the concentration of the element in solution is less than detection limit, and the partition coefficient of the element is calculated with the concentration of detection limit; the same for the table 4)

表 4 HAP 在不同浓度 HNO₃ 中对元素的静态分配系数

Table 4 Partition coefficient of different elements on HAP in different concentration of nitric acid solutions

c(HNO ₃)/ (mol · L ⁻¹)	元素静态分配系数(Partition coefficient of different elements)/(mL · g ⁻¹)						
	Sr	Zr	Ru	Sm	Ce	Se	Cs
0.05	>3.2×10 ⁶ *	>8.2×10 ⁴ *	9.34×10 ²	>4.2×10 ⁴ *	>2.7×10 ⁵ *	48.4	6.0×10 ⁴
0.2	6.90×10 ⁶ *	1.80×10 ⁴ *	936×10 ²	2.41×10 ³	3.50×10 ²	33.1	1.77×10 ³
1.0	2.18×10 ²	1 440	2.86×10 ²	3.08×10 ²	1.67×10 ²	21.2	2.87×10 ²
3.0	12.6	166	25.6	5.45	2.48	7.69	81.0
6.0	1.68	8.97	6.87	15.6	9.98	21.6	24.0

Sm 基本不吸附。HAP 吸附 400~1 000 mL 分别含 Cs、Sm、Sr 或 Ce 的 HNO₃ 溶液后,吸附流出液中仍然没有元素的漏穿,对这些核素的吸附容量分别达到 24、3.38、19.2、8.62 mg/g 以上;而 HAP 对 Se 和 Ru 有少量的吸附,但是吸附容量不大(<200 μg/g)。HMD 和 HAP 对 7 种裂变元素的动态吸附性能与静态吸附的趋势一致。

2.4 HAP 和 HMD 对混合裂变元素的吸附研究结果

140 mL 含有 6 种混合元素的 HNO₃ 溶液(因为 ICP 不能测定 Cs,而其它金属离子会对使用离子色谱测定 Cs 时造成干扰,所以在混合元素的 HNO₃ 溶液中均不加入 Cs)分别通过 HMD 柱和 HAP 柱吸附,吸附流出液每 20 mL 取样分析溶液中元素的浓度,实验结果分别列于表 5 和表 6。HMD 对溶液中 Zr、Se 和 Ru 的吸附效果较好,吸附体积为 100 mL 时,吸附率为 100%,而 HMD 对 Sm、Ce、Sr 基本不吸附。表 6 的数据中,HAP 除了对 Sr 和 Se 的吸附率较高外,对其它元素的吸附能力都较差。HAP 交换剂的吸附容量相对比较小,而吸附液中总的元素量比较大,HAP 对 Sr 的选择吸附性比较强,所以 Sr 优先被吸附,虽然 HAP 对 Zr、Se 和 Ru 的吸附性能差,但是由于 HAP 对 Ce 和 Sm 的选择性也不是很强,所以当含 Zr、Se、Ru、Ce 和 Sm 的溶液一起通过 HAP 吸附时,HAP 对它们的吸附选择性是一样的,而 HAP 的吸附容量有限,从而导致 HAP 对 Ce 和 Sm 的吸附率也较低。含 Zr 的溶液通过 HAP 柱

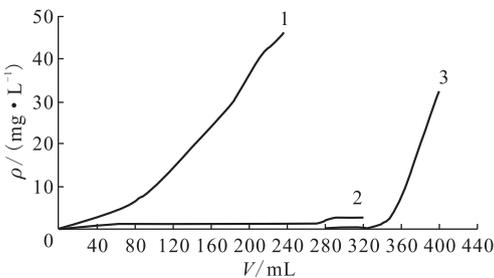


图 1 HMD 对 Zr、Se、Ru 的穿透曲线

Fig. 1 Breakthrough curves of Zr, Se and Ru on HMD

- 1—Zr, ρ_f(Zr)=69.8 mg/L;
- 2—Ru, ρ_f(Ru)=28.6 mg/L;
- 3—Se, ρ_f(Se)=28.9 mg/L

吸附后,吸附流出液有白色沉淀,沉淀静置后上层清液中未测到 Zr,而沉淀中 Zr 的含量较高,说明含 Zr 的溶液通过 HAP 后发生水解反应,因此沉淀为 Zr 的水解产物;而表 5 和表 6 中 Zr 浓度的

测定值不符合相关规律,是由于测量中仪器进样管插入样品液时的深浅不一致造成的(含有沉淀的样品未做其它处理直接取样),Zr 实际上并没有吸附在 HAP 柱上。

表 5 6 种元素混合液流经 HMD 柱的流出液中各元素的质量浓度
Table 5 Mass concentrations of six elements in eluates from a HMD column mg/L

流出液编号 (Serial number of eluate)	进料液中的元素及其质量浓度(Elements and their mass concentrations in the feed solution)					
	Sr	Sm	Ru	Ce	Zr	Se
	19.2	8.44	30.0	48.5	71.8	28.9
1	20.2	7.21	0.432	16.9	-	0.03
2	20.5	9.40	-	53.1	-	-
3	20.2	9.41	-	54.4	-	-
4	20.4	9.37	-	54.3	-	-
5	20.2	9.36	-	54.1	-	0.167
6	19.9	9.26	-	53.6	0.34	0.382
7	20.0	9.25	-	53.2	2.62	1.16

表 6 6 种元素混合液流经 HAP 柱的流出液中各元素的质量浓度
Table 6 Mass concentrations of six elements in eluates from a HAP column mg/L

流出液编号 (Serial number of eluate)	进料液中的元素及其质量浓度(Elements and their mass concentrations in the feed solution)					
	Sr	Sm	Ru	Ce	Zr	Se
	19.2	8.44	30.0	48.5	71.8	28.9
1	-	4.26	23.0	23.4	0.047	7.52
2	1.99	8.04	26.2	45.5	0.116	7.44
3	4.67	8.84	27.0	49.9	0.246	7.78
4	12.1	9.46	28.1	57.0	66.8	31.6
5	4.66	8.79	26.3	49.3	0.204	8.29
6	12.0	9.15	26.7	52.1	11.2	10.9
7	18.1	9.68	28.5	59.1	80.0	37.0

2.5 HMD 和 HAP 联合使用对含混合裂变元素 HNO₃ 溶液的吸附研究结果

根据 HMD 和 HAP 的性质,使含混合元素的吸附液通过 HMD 吸附后再通过 HAP 吸附,这样可以使溶液先通过 HMD 吸附时,溶液中的 Ru、Zr 和 Se 被吸附;吸附液再进入 HAP 吸附时,Ru、Zr 和 Se 不会对 HAP 的吸附容量产生影响,而且还可以避免由于 Zr 在 HAP 柱吸附产生沉淀。

100 mL 含混合裂变产物元素的 HNO₃ 溶液依次经过 HMD 和 HAP 吸附,表 7 为元素的吸附率数据。含混合元素的溶液通过 HMD 吸附时,溶液中的 Ru、Zr 和 Se 基本全部被吸附,有

12.9% 的 Ce 被吸附,而 Sr 和 Sm 完全不吸附;当溶液通过 HAP 吸附时,溶液中剩余的 Sr、Sm 和 Ce 全部被吸附;混合元素溶液经过 HMD 和 HAP 柱的串联吸附后,溶液中 Sr、Sm、Ru、Ce、Zr 和 Se 基本被交换剂定量吸附。

3 结论

HMD 和 HAP 在硝酸铀酰溶液中不吸附铀。HMD 在 0.2 mol/L HNO₃ 溶液中对 Zr、Ru 和 Se 的吸附性能较好,HAP 在 0.2 mol/L HNO₃ 溶液中对 Sr、Cs、Ce 和 Sm 的吸附性能较好。含有 Sr、Sm、Ru、Ce、Zr 和 Se 的 0.2 mol/L HNO₃ 依次通过 HMD 和 HAP 柱吸附后,元素基本被全部

表 7 HMD 和 HAP 联合使用对混合元素吸附数据

Table 7 The adsorption on HMD and HAP from the mixed solution

交换剂(Exchangers)	元素吸附率(Adsorption percentage)/%					
	Sr	Sm	Ru	Ce	Zr	Se
HMD	0	0	95.7	12.9	100	100
HAP	99.9	99.2	2.96	100	0	0
	(99.9)	(99.1)	(95.8)	(100)	(100)	(100)

注(Note):括号中数据为元素总吸附率(Data in parentheses are total adsorption)

吸附。因此,HMD 和 HAP 可用于 HNO₃ 溶液中 Sr、Sm、Ru、Ce、Zr、Cs 和 Se 的去除,有望用于 MIPR 燃料溶液的净化,但 HMD 和 HAP 在硝酸铀酰溶液中对裂变产物元素的去除有待进一步的研究。

致谢:感谢参与本项目的中国核动力研究设计院一所放化室张劲松研究员、陈云明高工和其他工作人员。

参考文献:

- [1] 邓启民,李茂良,程作用. 医用同位素生产堆(MIPR)生产⁹⁹Mo 的应用前景[J]. 核科学与工程,2006,26(2):68-70.
- [2] Lane S A, Macpherson H O, Maslan F. Fluid Fuel Reactors[M]. Addison-Wesely Publishing Co. Inc., Massachusetts, USA, 1956: 110.
- [3] 吴武华. 核燃料化学工艺学[M]. 北京:原子能出版社,1989:193-293.
- [4] Clearfield A. Inorganic Ion Exchangers, Past, Present, and Future[J]. Solv Extra Ion Excha, 2000, 18(4): 655-679.
- [5] Cunha I I L, Andrade e Silva L G. Recovery of ¹³⁷Cs From Acidic Fission Products Solutions[J]. J Radioanal Nucl Chem Letters, 1986, 105(5): 293-300.
- [6] Sylvester P, Clearfield A. The Removal of Strontium and Cesium From Simulated Hanford Ground Waster Using Inorganic Ion Exchange Material[J]. Solv Extra Ion Excha, 1998, 16(6): 1 527-1 539.
- [7] 孙兆祥,李玉红. 水合五氧化二锑的合成及其对 Sc 吸附性能的研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),1997,33(1):99-102.
- [8] 李太华. 用水合五氧化二锑分离放射性母子体的研究——一个新的²⁰¹Pb-²⁰¹Tl 发生器的制备[J]. 离子交换与吸附,1998,14(1):41-46.
- [9] Ane M, Uno K. Synthetic Inorganic Ion-Exchange Materials: XIX. Ion-Exchange Behavior and Separation of Alkaline Earth Metals on Crystalline Antimonic(V) Acid as a Cation Exchanger[J]. Separ Sci Technol, 1979, 14(4): 335-366.
- [10] Zouad S, Jean J, Loss-Nescoviv C, et al. Sorption of Strontium and Lanthanum on Polyantimonic Acid and Two Phosphatoantimonic Acids[J]. J Radioanal Nucl Chem, 1994, 182(2): 193-204.
- [11] 翁皓珉,李太华,韩俊,等. 利用无机离子交换剂——多聚锑酸从 1AW 中提取裂变核素⁹⁰Sr 的研究[J]. 核科学与工程,1982,3:238-244.
- [12] Bigliocca C, Girardi F, Pauly J, et al. Radiochemical Separation by Adsorption on Manganese Dioxide[J]. Anal, 1967, 39(13): 1 634-1 639.
- [13] Kanungo S B, Tripathy S S, Rajeev. Adsorption of Co, Ni, Cu, and Zn on Hydrous Manganese Dioxide From Complex Electrolyte Solution Resembling Sea Water in Major Ion Content[J]. J Collo Interfa Sci, 2004, 269(1): 1-10.
- [14] 马军,李圭白. 用二氧化锰强化过滤过程的除污染效能[J]. 给水排水,1996,22(4):450-455.
- [15] Grunder M, Dozol J F, Asfari Z, et al. Simultaneous Removal of Technetium and Cesium by Functionalized Calixarenes From Acidic Liquid Waste[J]. J Nucl Chem, 1999, 24(1): 59-67.
- [16] 孙兆祥,唐志刚,韩俊,等. 新型复合无机离子交换剂磷酸钛——AMP 回收¹³⁷Cs 的研究[J]. 核化学与放射化学,1983,5(4):257-264.
- [17] Baetsle L, Pelsmaekers J. Ion Exchange Properties of Zirconyl Phophates- I[J]. J Inorg Nucl Chem, 1961, 21: 124-134.
- [18] 邓启民,李茂良,程作用. 磷酸锆-磷酸铈复合离子交换剂提取铯[J]. 核动力工程,2006,27(1):96-98.
- [19] Gregg J L, Wagner M J, Carlson C D. Actinide, Strontium, and Cesium Removal From Hanford Radioactive Tank Sludge[J]. Sol Extra Ion Excha, 1996, 14(1): 35-60.
- [20] 谈定生,朱永达,诸永泉,等. 氧化法制备胶体Sb₂O₃过程中胶体的大小及分布[J]. 上海大学学报(自然科学版),1998,4(6):698-702.